



Efecto de la agitación y la posición de inmersión en las curvas de enfriamiento para un acero SAE 4340

Ricardo Daniel López García

ricardo.lg@cdvictoria.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-2662-6103>

TECNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria

María Magdalena Reyes Gallegos

maria.rg@cdvictoria.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-0080-8902>

TECNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria

Israel Medina Juárez

israel.mj@cdvictoria.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8633-8157>

TECNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria

Araceli Maldonado Reyes

araceli.mr@cdvictoria.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3585-8034>

TECNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria

Carlos Puga Patlán

M21380025@cdvictoria.tecnm.mx

TECNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria

Correspondencia: ricardo.lg@cdvictoria.tecnm.mx

Artículo recibido 21 noviembre 2022 Aceptado para publicación: 21 diciembre 2022

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Cómo citar: López García, R. D., Reyes Gallegos, M. M., Medina Juárez, I., Maldonado Reyes, A., & Puga Patlán, C. (2022). Efecto de la agitación y la posición de inmersión en las curvas de enfriamiento para un acero SAE 4340. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 8637-8654. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.4024

RESUMEN

El temple es uno de los tratamientos térmicos más utilizados en la industria Metal-Mecánica y Metalúrgica para mejorar las propiedades mecánicas en los aceros empleando altas velocidades de enfriamiento que permiten la transformación de austenita a martensita. Sin embargo, el temple involucra diversos fenómenos acoplados físicos-térmicos-mecánicos los cuales son difíciles de controlar y predecir, exponiendo la calidad de las piezas templadas cuando no se cuenta con un óptimo diseño del proceso. La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de la posición de inmersión de las piezas y de agitación del medio líquido, sobre la extracción de calor representado por las curvas de enfriamiento, lo anterior permitirá determinar con mayor exactitud el coeficiente de transferencia de calor (CTC) en piezas de un acero en forma de "C" de tipo SAE 4340. Se diseñó y construyó un sistema de enfriamiento controlando (agitación del líquido y la posición de inmersión). Los resultados obtenidos permitieron analizar la historia térmica del enfriamiento de las muestras mediante curvas de enfriamiento y se calculó el coeficiente de transferencia de calor a través de elementos finitos.

Palabras clave: temple; curvas de enfriamiento; CTC; acero SAE 4340.

Effect of agitation and immersion position on cooling curves for SAE 4340 steel

ABSTRACT

Quenching is one of the most widely used heat treatments in the Metal-Mechanical and Metallurgical industry to improve the mechanical properties of steels using high cooling rates that allow the transformation of austenite to martensite. However, quenching involves various physical-thermal-mechanical coupled phenomena which are difficult to control and predict, exposing the quality of tempered parts when there is no optimal process design. The objective of this investigation is to evaluate the effect of the immersion position of the pieces and the agitation of the liquid medium, on the heat extraction represented by the cooling curves, this will allow determining with higher accuracy the heat transfer coefficient (HTC) in SAE 4340 type "C" shaped steel pieces. A controlled cooling system (liquid agitation and immersion position) was designed and built. The results obtained allowed us to analyze the thermal history of the cooling of the samples by means of cooling curves and the heat transfer coefficient was calculated through finite elements.

Keywords: *quenching; cooling curves; HTC; SAE 4340 steel.*

INTRODUCCIÓN

De los tratamientos térmicos empleados a nivel industrial, el temple es el más utilizado en las industrias Metal-Mecánica y Metalúrgica con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas de los materiales tratados tales como su resistencia, dureza y tenacidad, involucrando la transformación de fase austenita a martensita a una alta velocidad de enfriamiento (Li y col, 2013; López y col, 2022). El tratamiento térmico de temple involucra una etapa de calentamiento hasta la temperatura de austenizado la cual está en función de la química de la aleación, un tiempo de permanencia para alcanzar una temperatura homogénea de las piezas y una velocidad de enfriamiento la cual determinará la microestructura final de las piezas o componentes y por ende sus propiedades mecánicas. Aunque el tratamiento térmico de temple puede parecer muy simple, la realidad es que es un proceso térmico complejo debido a que en él intervienen diversas variables difíciles de controlar tales como: el medio de enfriamiento, la temperatura del medio líquido, la agitación, la temperatura de austenizado, la dirección y velocidad de inmersión, la posición y geometría de las piezas al entrar al baño (Da Silva y col, 2012; Watanabe y col, 2020; De Oliveira y col, 2013), las cuales pueden ocasionar la formación de esfuerzos residuales de origen térmico y por transformación martensítica provocando fallas irreversibles en el material. Por tal motivo un número importante de investigaciones se han realizado en este sentido para estudiar los diferentes fenómenos y determinar el efecto de las variables presentes en el proceso de temple (Kang & Im, 2007).

Debido a lo anterior, el diseño óptimo del tratamiento térmico de temple es un desafío para académicos e ingenieros en la industria que utilizan este tipo de procesos para la manufactura de piezas y componentes metálicos, el objetivo es controlar los parámetros que intervienen en el proceso, con la finalidad de minimizar los esfuerzos térmicos y de transformaciones de fase que pueden provocar defectos en las piezas tales como acumulación de esfuerzos, distorsiones y fracturas. La complejidad del proceso de temple, así como los mecanismos de transferencia de calor, la interacción de las propiedades mecánicas y de las transformaciones de fase, forman un complejo acoplamiento de los fenómenos térmicos-químicos-mecánicos-microestructurales que pueden presentarse de manera simultánea, y provocar en el templado un proceso complejo de controlar y predecir (Adedayo y col., 2014).

Para evaluar la efectividad del rendimiento del medio de temple, se utilizan las curvas de enfriamiento (historia térmica) de la pieza templadas. Las curvas de enfriamiento se pueden obtener enfriando una pieza de acero que contiene uno o varios termopares tanto en la superficie como en la parte del núcleo y sumergiéndola en el medio líquido seleccionado, los cambios de temperatura en función del tiempo se registran en una tarjeta de adquisición de datos, se almacenan y después se grafican para estudiar el comportamiento de la pieza durante el enfriamiento, los cuales varían en función del tipo de acero y de las condiciones del medio de temple utilizado (Aronsson, 2012).

Una vez que el metal a elevada temperatura hace contacto con el medio líquido, la eliminación de calor se presenta a través de todos los mecanismos de transferencia de calor en diferentes etapas. La primera etapa se conoce como “fase de vapor”, y se presenta inmediatamente después de que la pieza hace contacto con el líquido, aquí la pieza está a una temperatura elevada mayor que el líquido y al hacer contacto comienza a evaporarse, formando una capa de vapor que provoca un fenómeno de aislamiento en la pieza. La transferencia de calor en esta etapa es por radiación a través de la capa de vapor, esta capa de vapor actúa de manera de aislante dando como resultado un enfriamiento lento, y la duración de esta etapa dependerá de las propiedades del medio líquido. La etapa siguiente comienza cuando la temperatura de pieza ha disminuido y la “capa de vapor” formada al inicio colapsa. El aceite en este caso que se encuentra cercano a la pieza comienza a hervir, y provoca el incremento de la velocidad de enfriamiento lo que conduce a un incremento en la velocidad de enfriamiento, en esta etapa se presenta la mayor velocidad de enfriamiento y es conocida como “fase de ebullición”. Cuando la temperatura ha disminuido por debajo del punto de ebullición del medio de temple, el enfriamiento producido se lleva a cabo por conducción y convección, la última etapa del enfriamiento es conocida “fase de convección” (Fletcher & Griffiths, 2013; Bouissa y col., 2019; Hasan, 2009).

Durante el temple la velocidad de enfriamiento debe ser lo suficientemente rápida para suprimir las transformaciones de fase controladas por la difusión (ferrita, perlita, cementita, bainita) y lograr una transformación completa de la fase adifusional martensita, debido a que esta última es la responsable de altas propiedades mecánicas deseadas en las piezas y componentes templados. En control de las variables en el temple radica en seleccionar una velocidad de enfriamiento adecuada para transformar la

microestructura completa de austenita a martensita, pero sin ser muy alta que pudiera ocasionar problemas en las piezas templadas como la acumulación de esfuerzos residuales, distorsiones y fallas por fractura. Los medios de enfriamiento tradicionalmente utilizados en el temple son agua, salmuera, aire y aceite, este último a diferentes temperaturas, donde el medio de temple más adecuado será el que presente una limitada etapa de vapor, una acelerada etapa de ebullición nucleada, y una velocidad moderada en la etapa de enfriamiento por convección (Hasan y col., 2018).

Como se mencionó anteriormente existen diversos parámetros durante la etapa de enfriamiento que influyen considerablemente en el mecanismo de transferencia de calor, y que por lo tanto impactan en la curva de enfriamiento o historia térmica al final del enfriamiento, la cual está relacionada con el coeficiente de transferencia de calor. El coeficiente de transferencia de calor es utilizado para el cálculo de la transferencia de calor por convección cuando un material sólido es enfriado en un medio líquido, y se atribuye a la energía por el movimiento molecular del fluido. El coeficiente de transferencia de calor dependerá del flujo de calor, el área superficial en el material sólido y la diferencia (ΔT) de temperatura entre el material sólido y el medio líquido de enfriamiento. La ecuación 1 representa el cálculo para determinar el coeficiente de transferencia de calor:

$$HTC = \frac{q}{A \cdot \Delta T} \quad (1)$$

donde q es el flujo de entrada de calor (s), A es el área superficial de transferencia de calor y ΔT es la diferencia de temperaturas entre el metal y el medio líquido, las unidades empleadas son (W/m^2C).

Diversos autores han reconocido que durante el proceso de temple existe una compleja interacción entre fenómenos térmicos y la expansión volumétrica debido a la transformación de fases austenita-martensita, las cuales son las responsables de la presencia de esfuerzos residuales, y si estos esfuerzos se encuentran en ordenes de magnitud superiores al esfuerzo de cedencia del material ocurrirá la deformación plástica en la pieza (Denis y col, 1987; Inoue y col, 1992; Kang & Im, 2007). En las últimas 3 décadas, se ha incrementado el uso de modelos matemáticos basados en métodos de elementos finitos (MEF) en el área de la metalurgia empleados en procesos de templado capaces de predecir de manera muy cercana la interacción entre las variables del proceso de temple mejorando las condiciones de estos procesos. Debido a la complejidad entre

las diferentes variables en MEF no presenta una solución analítica a las ecuaciones que gobiernan los fenómenos presentes, por lo que es necesario determinar una teoría de acoplamiento termo-mecánico-metalúrgico. Diversos investigadores (Huang y col. 2000; Şimşir 2014, Kang y col. 2007; Basak & Levitas 2019) han propuesto algunos casos de simulación numérica utilizando (MEF) para dar solución a esta problemática, y donde han utilizado softwares comerciales como ANSYS, DEFORM 3D, DANTE, FORGE y HEARTS (Gür & Pan, 2009). La simulación mediante MEF del proceso de temple es sensible a la precisión de los datos de entrada, aunado a esto las simulaciones de este tipo de procesos requieren de un número importante de datos del material de trabajo y las condiciones de frontera entre el material y el medio de enfriamiento (Serajzadeh, 2004; Wolff y col. 2005), por lo tanto, la adquisición de datos precisos es determinante para la obtención de resultados confiables. Los datos de entrada a los softwares de simulación generalmente están en función de la temperatura y la composición química del material, incrementando la cantidad de información que puede ser obtenida y manipulada para su análisis y toma de decisiones. En este contexto, los procesos industriales que utilizan tratamientos térmicos para la fabricación de piezas o componentes metálicas que se encuentran en constante fricción, desgaste o sometidos a un alto nivel de esfuerzos mecánicos, y que a su vez requieren de altas propiedades mecánicas como lo son la mayoría de las piezas de acero utilizados en la industria automotriz, hace de vital importancia profundizar en el conocimiento de los fenómenos que ocurren durante la etapa de enfriamiento.

El objetivo de la presente investigación fue diseñar y fabricar un baño de enfriamiento para realizar tratamientos térmicos de temple controlando variables como la velocidad de agitación y la posición de las piezas al entrar al baño de temple. La finalidad fue determinar las curvas de enfriamiento de las diferentes condiciones empleadas y mediante la historia térmica resultante utilizar un software de simulación para determinar el coeficiente de transferencia de calor.

METODOLOGÍA

La composición química del acero utilizado en la presente investigación es mostrada en la Tabla 1, el cual pertenece a un acero de medio contenido de carbono tipo SAE 4340, sus principales elementos de aleación son el Ni y el Cr.

Tabla 1

Composición química del acero SAE 4340.

| Elemento | C | Cr | Mo | Ni | Mn | Si | S | P | Fe |
|----------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| % e.p. | 0.40 | 0.89 | 0.25 | 1.80 | 0.70 | 0.30 | 0.021 | 0.005 | Bal. |

El acero estudiado fue maquinado a partir de una barra de 2 in de diámetro para obtener probetas con geometría de tipo en "C" o anillo, ver Figura 1, las dimensiones de las piezas fueron (diámetro interior 31.82 mm, diámetro exterior 50.80 mm, espesor 19.01 mm, ancho 16.01 mm y la apertura es de 6.55 mm). El diseño de la probeta se realizó en el software Solidwork's y una vez maquinadas fueron instrumentadas mediante termopares tipo K fijados en la superficie y en el núcleo de las muestras. Lo anterior permitió evaluar el comportamiento de estas durante la etapa de enfriamiento y analizar la historia térmica bajo diferentes condiciones de pruebas.

Figura 1

Geometría de la pieza anillo en "C" del acero SAE 4340 utilizada en el estudio.



El calentamiento de las muestras se llevó a cabo en un horno de tipo eléctrico marca Luzeren 7L con temperatura máxima de operación de 1000 °C, las muestras de los anillos tipo en "C" se instrumentaron con termopares tipo K, fijados tanto en la superficie a través de una soldadora por puntos y en el centro (a la mitad de la pieza) sujetos mediante un opresor, los termopares fueron conectados a una tarjeta de adquisición de datos de 10 canales marca OMEGA. Las muestras fueron calentadas a una velocidad de calentamiento controlada de 5 °C/min hasta alcanzar la temperatura de austenizado de

860 °C, una vez alcanzada la temperatura las muestras se mantuvieron por un tiempo de permanencia de 30 min para obtener una microestructura homogénea de fase austenita. El enfriamiento se llevó a cabo en un medio líquido de aceite a 60 °C calentada mediante una parrilla eléctrica y controlado mediante termopares, para la agitación del medio líquido se consideraron dos formas (agitación vigorosa y sin agitación) esta fue producida a través de una bomba mecánica 1 hp. El equipo fabricado con todas sus partes es mostrado en la Figura 2, donde se puede observar el sistema de enfriamiento completo. Adicional y como parte de una variable de estudio se consideró la posición de la pieza al entrar al medio líquido de aceite (vertical en dirección del eje -Z y horizontal en dirección del eje -Y) de acuerdo a la Figura 3.

Figura 2

Equipo utilizado en el estudio para el tratamiento térmico de temple, sistema de temple completo (lado izquierdo) y sistema de inmersión (lado derecho).

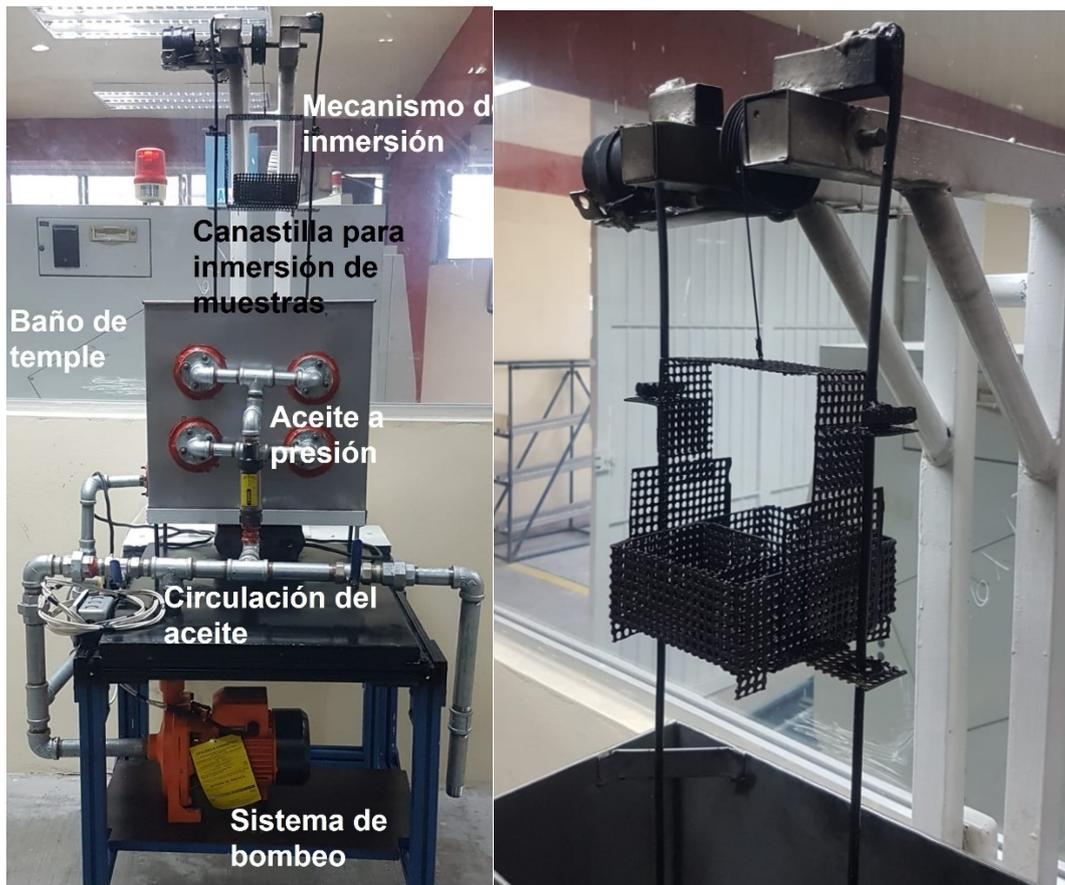
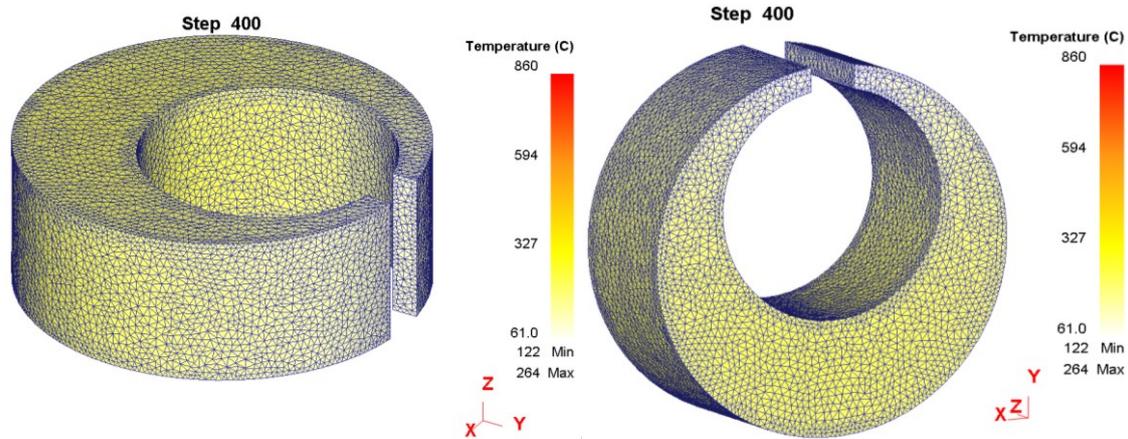
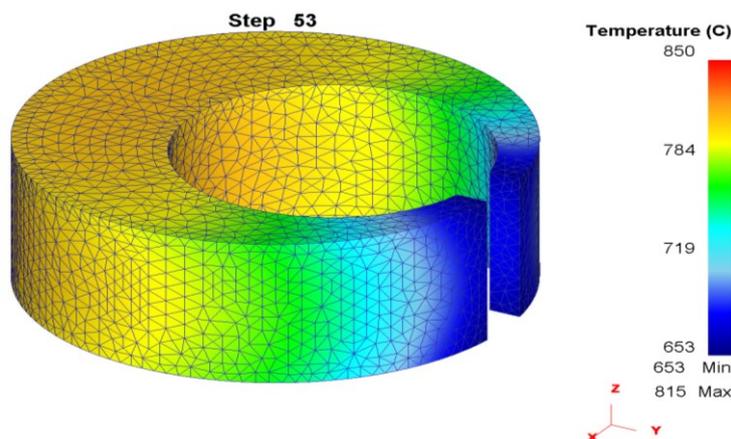


Figura 3. Posición de las piezas al entrar al baño líquido de aceite, horizontal lado izquierdo, y vertical lado derecho..



Una vez enfriadas las piezas en el medio líquido de aceite bajo las condiciones estudiadas, los datos de las curvas de enfriamiento para cada prueba realizada, fueron utilizados en el software Deform 3D para calcular el coeficiente de transferencia de calor. El dominio computacional utilizado es presentado en la Figura 4, donde se utilizó un modelo tridimensional de 100,000 elementos y 34580 nodos. Las propiedades termofísicas, térmicas y mecánicas del acero SAE 4340 se obtuvieron tanto de la literatura, de softwares de simulación como JMatPro, así como de los resultados experimentales después del templado.

Figura 4. Dominio computacional utilizado en la simulación mediante Deform-3D.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5, se muestran los resultados de las curvas de enfriamiento del acero estudiado, los datos representan a la superficie de las muestras obtenidas tanto de posición vertical (línea sólida) como horizontal (línea punteada), ambas con agitación del líquido. Se puede observar que al inicio del enfriamiento y hasta una temperatura de 530

°C para la posición horizontal la curva de enfriamiento presenta una velocidad máxima calculada de 280 °C/s, sin embargo, a partir de esa temperatura la velocidad de enfriamiento disminuye hasta 24 °C/s y sigue decreciendo, la temperatura final de transformación martensítica para este acero se alcanza cerca de 200 °C que corresponde a un tiempo de enfriamiento de 33 s. Para el caso del enfriamiento de la pieza en posición vertical al inicio de este alcanza una velocidad de enfriamiento de 82 °C/s casi 200 °C/s menos que la posición horizontal, sin embargo, la velocidad de enfriamiento se mantiene incluso por encima de esta velocidad hasta alcanzar una temperatura cercana a la transformación de martensita, el tiempo de enfriamiento al final de la transformación es de solo 10 s, lo que representa a 23 s menos que la condición de inmersión horizontal.

Para el caso de la Figura 6, se presentan las curvas de enfriamiento obtenidas del núcleo de las piezas en dirección vertical (línea sólida) y dirección horizontal (línea punteada), ambas curvas con agitación del líquido. Se puede apreciar, que el comportamiento de la curva durante el enfriamiento al igual que la Figura 5 en la dirección de inmersión horizontal comienza con una velocidad de enfriamiento más elevada en el orden de 43 °C/s pero disminuye gradualmente hasta una temperatura de 300 °C con un promedio de 16 °C/s, el tiempo final hasta alcanzar la transformación de martensita se presentó a 39 s después de iniciado la prueba en enfriamiento posterior a esta temperatura la velocidad de enfriamiento es muy lenta. Para la dirección de inmersión vertical, al inicio de la prueba la velocidad de enfriamiento más alta se registró en 31 °C/s, el promedio de la velocidad de enfriamiento hasta la temperatura final de la transformación de martensita fue de 17 °C/s muy similar a la velocidad presente a la dirección horizontal, sin embargo, la velocidad de enfriamiento es más rápido después de esta temperatura.

De las Figuras 5 y 6 que corresponden a la condición de inmersión vertical y horizontal con agitación del baño para la superficie y el núcleo, se puede observar que aunque al inicio de la prueba para la condición de inmersión horizontal favorezca para obtener una velocidad de enfriamiento más alta, esto es solo en un rango de temperatura corto y no se mantiene durante todo el ciclo de enfriamiento, el tiempo que tarda en enfriarse la muestras hasta alcanzar la temperatura de transformación martensítica final es más largo cuando se ingresa la muestra al baño en esta dirección. En cambio, la dirección vertical, al inicio de la prueba presenta una velocidad de inmersión más lenta, pero el promedio de la velocidad de enfriamiento hasta alcanzar la temperatura final de transformación

martensítica es más elevada. Por lo tanto, el tiempo de transformación es más corto, lo que permite obtener una fracción de martensita más elevada bajo esta condición cuando es la posición vertical al baño y con agitación.

Figura 5. Curvas de enfriamiento del acero SAE 4340 de la superficie en condición vertical y horizontal con agitación del aceite a una temperatura de 60 °C.

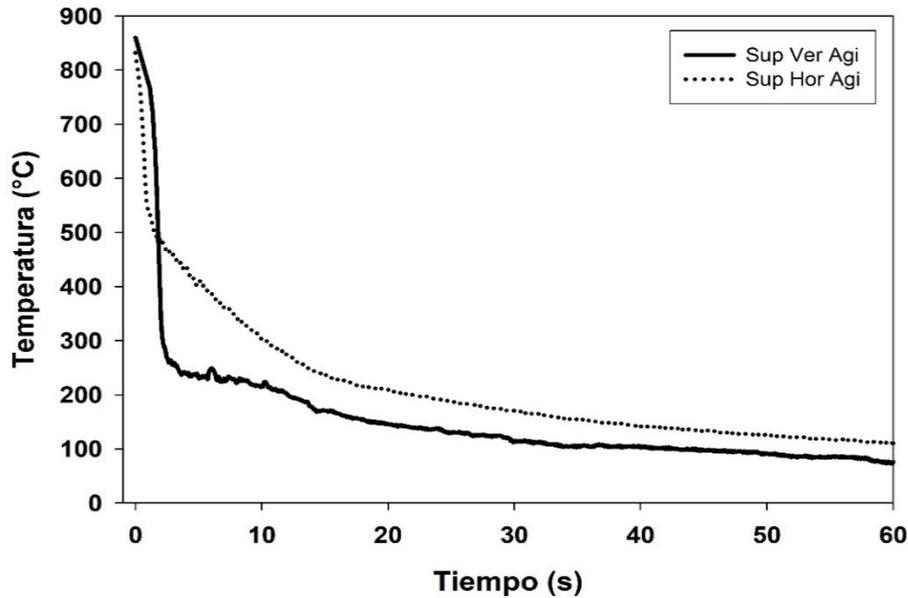
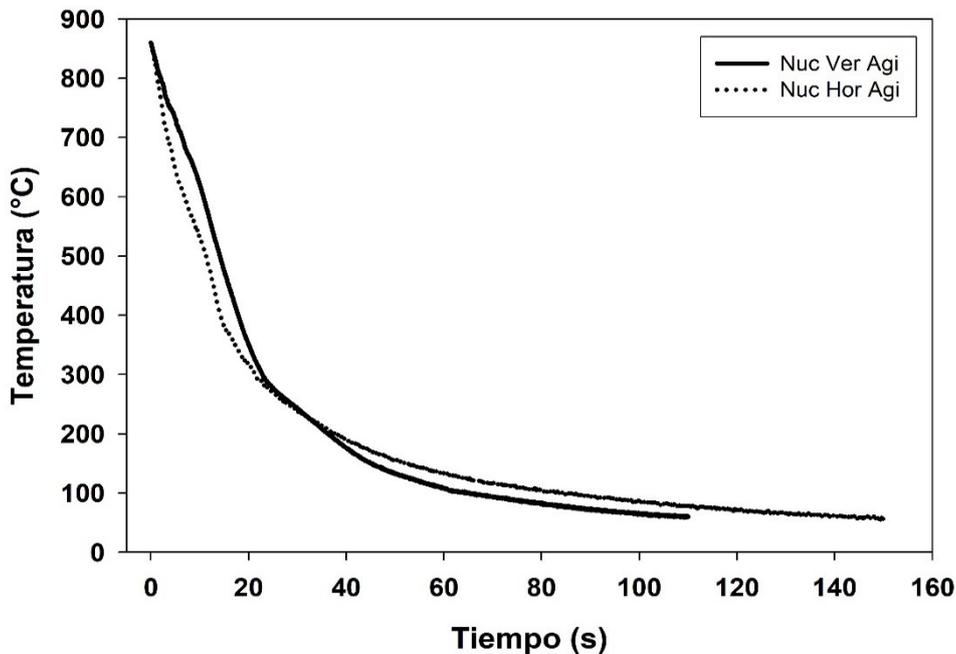


Figura 6. Curvas de enfriamiento del acero SAE 4340 del núcleo en condición vertical y horizontal con agitación del aceite a una temperatura de 60 °C.



Las Figuras 7 y 8, representan las curvas de enfriamiento obtenidas para la superficie (ver Figura 7) y el núcleo (ver Figura 8) de las piezas sin agitación para las condiciones de inmersión vertical (línea sólida) y horizontal (línea punteada). Se puede observar para la

Figura 7, las curvas de enfriamiento obtenidas en la superficie de las muestras para ambas condiciones de inmersión, al inicio del enfriamiento presentan una lenta velocidad de enfriamiento registrando un promedio de 7 y 4 °C/s para la condición de inmersión horizontal y vertical respectivamente. A llegar a una temperatura cercana a 800 °C, la velocidad de enfriamiento incrementa en un orden de 40 °C/s y 20 °C/s para la dirección de inmersión horizontal y vertical respectivamente, esta velocidad de enfriamiento no es constante, sino que solo se presenta en un corto periodo de tiempo. Se puede observar que cuando el medio líquido no está agitado la extracción de calor de las piezas ensayadas es menos rápida y favorece para la condición de inmersión horizontal, sin embargo, el tiempo de enfriamiento hasta el final de la transformación es mayor. Para el caso del enfriamiento en el núcleo para la condición de no agitación para ambas condiciones de inmersión, el comportamiento de las curvas de enfriamiento muestra al inicio una velocidad de enfriamiento de 5 y 3 °C/s para la condición de inmersión horizontal y vertical respectivamente, posterior a una temperatura cercana de 800 °C la velocidad de enfriamiento aumenta hasta alcanza una velocidad máxima de 32 °C/s y 18°C/s para la condición horizontal y vertical respectivamente. El tiempo promedio de enfriamiento en el centro de las piezas fue de 80 s, y la velocidad promedio hasta la temperatura cercana a la transformación de martensita fue de 17 °C/s y 13 °C/s para la condición de inmersión horizontal y vertical respectivamente.

Los resultados de las curvas de enfriamiento obtenidas bajo diferentes condiciones de prueba para el acero SAE 4340, fueron comparadas con estudios similares y posteriormente se realizó un promedio para obtener un perfil de enfriamiento tanto en la superficie como en el núcleo de las piezas. Una vez obtenido la historia térmica para la superficie y el núcleo de las piezas, fueron utilizados como datos de entrada para la simulación en el software Deform 3D y obtener después de la simulación por elementos finitos un coeficiente de transferencia de calor simulado en base a la historia térmica de las muestras estudiadas, ver Figura 9.

El comportamiento del coeficiente de transferencia de calor obtenido por el software alcanza su máximo valor cercano al inicio de la transformación de la bainita del acero estudiado, siendo este en una magnitud cercano a 5000 W/m²°C, y posterior durante el enfriamiento presenta una caída hasta valores cercano a 1000 W/m²°C al final del enfriamiento, ver Figura 10. Estos valores están acordes a los reportados por varios

investigadores en aceros con composición química cercana y permite a partir de la obtención de esta condición, predecir el comportamiento en cuanto a las propiedades mecánicas, transformaciones de fase, las distorsiones presentes y la distribución y acumulación de esfuerzos residuales que puede presentar el material bajo condiciones de templado.

Figura 7. Curvas de enfriamiento del acero SAE 4340 de la superficie en condición vertical y horizontal sin agitación del aceite a una temperatura de 60 °C.

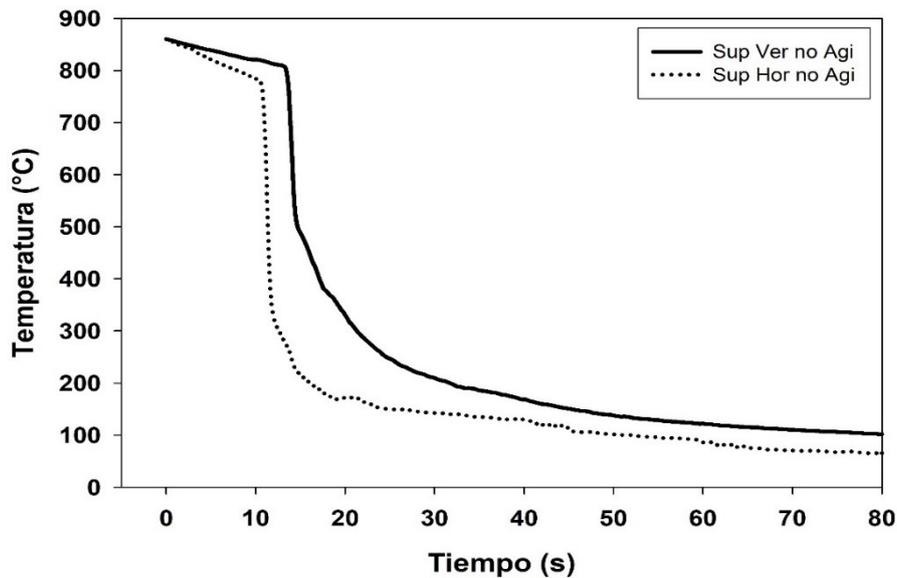


Figura 8. Curvas de enfriamiento del acero SAE 4340 del núcleo en condición vertical y horizontal sin agitación del aceite a una temperatura de 60 °C.

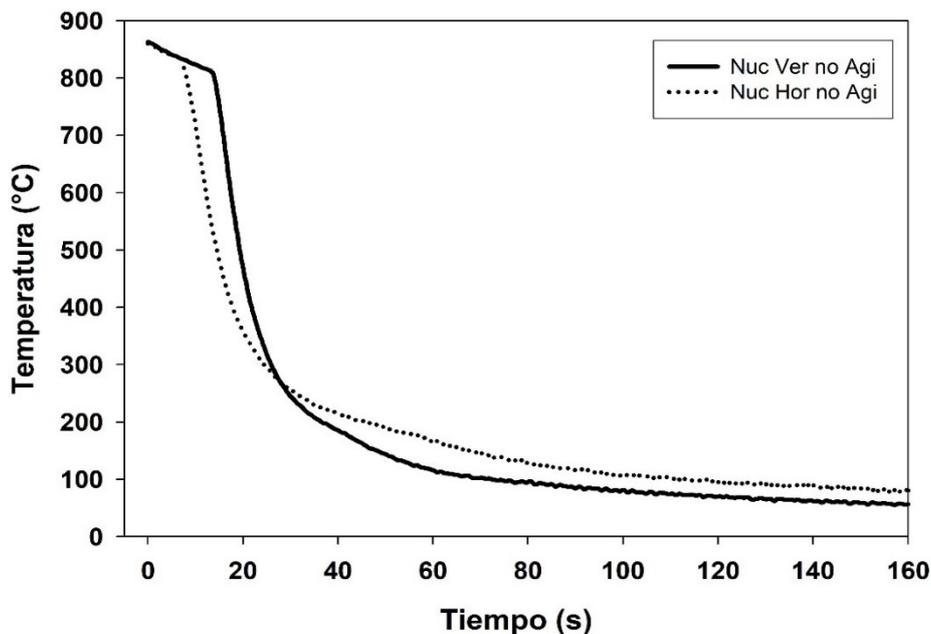


Figura 9.

Coefficiente de transferencia de calor empleado en los datos de entrada para simulaciones en Deform 3D para el acero estudiado.

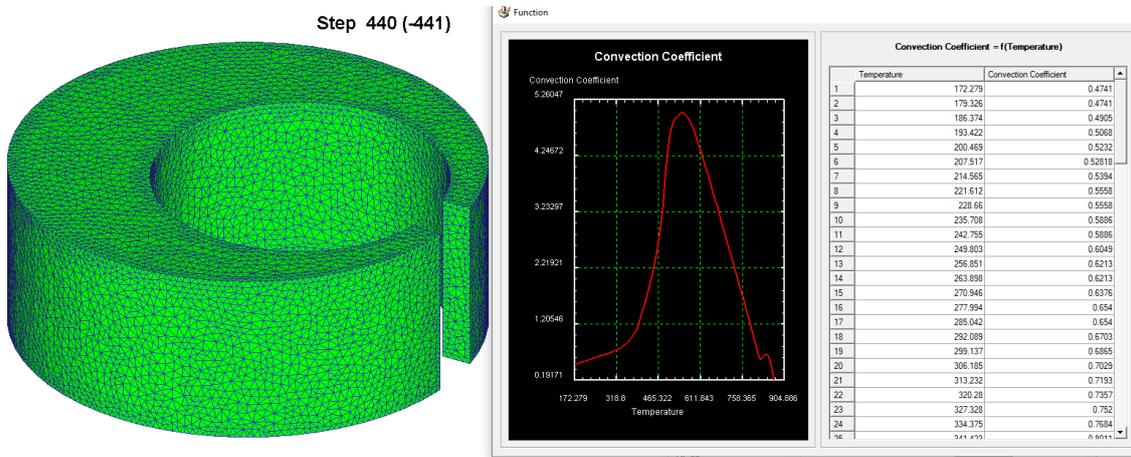
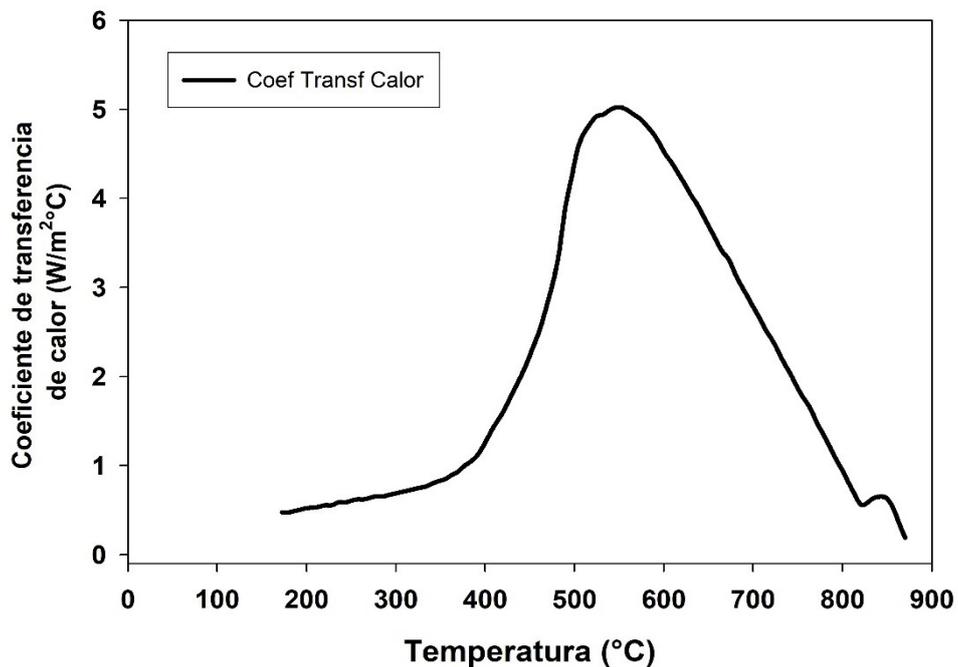


Figura 10.

Coefficiente de transferencia de calor (unidades por 1000) obtenido a partir del promedio de las curvas de enfriamiento para las condiciones estudiadas y modeladas en Deform 3D.



CONCLUSIONES

Se realizó un estudio para evaluar el comportamiento de la historia térmica a través de las curvas de enfriamiento para piezas de acero SAE 4340 de tipo anillo en “C”, instrumentadas a través de termopares tipo “K” fijados tanto en la superficie como en la

mitad de la pieza, así mismo, se estudió la condiciones de inmersión (vertical y horizontal al baño) y, con y sin agitación del medio líquido de aceite. Los resultados demostraron que cuando existe agitación en el baño líquido, la transferencia de calor evidentemente es más elevada y la velocidad de enfriamiento incrementa viéndose favorecido bajo esta condición las piezas que fueron enfriadas en dirección vertical al baño, para esta dirección los tiempos de enfriamiento son más cortos y por lo tanto la transformación de fases austenita martensita es más rápida lo que se traduce en un mayor porcentaje de martensita transformada, mayor dureza y resistencia mecánica. Sin embargo, cuando no existe agitación del medio líquido, la posición de inmersión horizontal presenta una velocidad de enfriamiento mayor que la posición vertical, favoreciendo esta condición para cuando no existe agitación y con geometrías similares a las estudiadas.

Una vez obtenidas las curvas de enfriamiento fueron empleadas como datos de entrada en el software de simulación Deform 3D para calcular el coeficiente de transferencia de calor para este tipo de acero, el cual no está reportado en la literatura. Los resultados muestran una buena predicción del coeficiente de transferencia de calor simulado, con este valor se pueden predecir otras propiedades con mayor precisión para este acero tales como, las transformaciones de fase, la dureza, la resistencia mecánica, la distorsión y los esfuerzos residuales que pueden presentarse debido a la transformación martensítica y a los gradientes térmicos durante el enfriamiento, siendo de gran utilidad para las empresas que utilizan este tipo de procesos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adedayo S. M., Adekunle A. S & Oladimeji T. (2014). Effect of quench immersion speed in water on the mechanical properties of C30 carbon steel. *Proceeding of the World Congress on Engineering Vol II WCE 2014*. 1283-1287.
- Aronsson-Rindby A. C. (2012). Compilation and validation of heat transfer coefficient of quenching oils. *Thesis*. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Basak A & Levitas V. I. (2019). Finite element procedure and simulations for a multiphase phase field approach to martensitic phase transformations at large strains and with interfacial stresses. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 343, no. 1, 368-406. DOI: 10.1016/j.cma.2018.08.006.
- Bouissa Y., Shahriari D., Champliaud H & Jahazi M. (2019). Prediction of heat transfer coefficient during quenching of large size forged blocks using modeling and

- experimental validation. *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 13, 100379. DOI: 10.1016/j.csite.2018.100379.
- Da Silva A., Pedrosa T., González-Méndez J., Jiang X., Cetlin P & Altan T. (2012). Distortion in quenching an AISI 4140 C-Ring-Predictions and experiments. *Materials and Design*, Vol. 42, 55-61. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.05.031.
- De Oliveira W. P., Savi M. A & Pacheco P. M. C. L. (2013). Finite element method applied to the quenching of steel cylinders using a multi-phase constitutive model. *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 83, 1013-1037. DOI: 10.1007/s00419-013-0733-x.
- Denis S., Sjostrom S & Simon A. (1987). Coupled temperature, stress, phase transformation calculation; model numerical illustration of the internal stresses evolution during cooling of a eutectoid carbon steel cylinder. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 18, 1203-1212. DOI: 10.1007/BF02647190.
- Fletcher A. J & Griffiths W. D. (2013). Heat transfer during vapour blanket stage of quench. *Materials Science and Technology*, Vol. 9, no. 11, 958-966. DOI: 10.1179/mst.1993.9.11.958.
- Gür C. H & Pan J. (2009). Handbook of thermal process modeling of steels. *Taylor & Francis*.
- Hasan H. S. (2009). Evaluation of heat transfer coefficient during quenching of steels. *Thesis*, Ph D, University of Technology, Cambridge U.K.
- Hasan H. S., Khaleefah R. H., Al haboubi N. A & Salman R. D. (2018). Effect of agitation, temperature, and quenching medium on cooling curve and cooling rate for steels. *Al-Nahrain Journal for Engineering Science*, Vol. 21, no. 4, 473-478. DOI: 10.29194/NJES.21040473.
- Huang D., Arimoto K., Lee K., Lambert D & Narazaki M. (2000). Prediction of quench distortion on steel shaft with keyway by computer simulation. *ASTM Proceedings: Heat Treating*, Vol. 2, 708-712.
- Inoue T., Ju D. Y & Arimoto K. (1992). Metallo-thermo-mechanical simulation on quenching process, theory and implementation of computer code heart. *In ASM International, Organizer, editor. Proceedings of the 1st international conference on quenching and control of distortion*. 205-212.
- Kang S. H & Im Y. T. (2007). Three-dimensional thermo-elastic-plastic finite element modeling of quenching process of plain-carbon steel in couple with phase

- transformation. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 49, no. 4, 423-439. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2006.09.014.
- Li Z., Freborg A. M., Hansen & Srivatsan T. S. (2013). Modelling the effect of carburization and quenching on the development of residual stresses and bending fatigue resistance of steel gears. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, 664-672. DOI: 10.1007/s11665-012-0306-0.
- López-García R. D., Medina-Juárez I & Maldonado-Reyes A. (2022). Effect of quenching parameters on distortion phenomena in AISI 4340 steel. *Metals*, Vol. 12, No. 5, 759-780. DOI: 10.3390/met12050759.
- Serajzadeh S. (2004). Modelling of temperature history and phase transformation during cooling of steel. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, no. 3, 311-317. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.010.
- Şimşir C. (2014). Modeling and simulation of steel heat treatment-prediction of microstructure, distortion, residual stress, and cracking. *ASTM Handbook Steel Heat Treating Technologies*, Vol. 4, 409-466.
- Watanabe K., Yamada M., Nakasaki M., Matsumoto R & Utsunomiya H. (2020). Determination of transformation plasticity coefficient of steel by horizontal quenching of shaft. *Procedia Manufacturing*, Vol. 50, 498-502. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.08.090.
- Wolff M., Böhm M., Löwisch G & Schmidt A. (2005). Modelling and testing of transformation-induced plasticity and stress-dependent phase transformation in steel via simple experiments. *Computational Material Science*, Vol. 32, no. 2-3, 604-610. DOI: 10.1016/j.commatsci.2004.09.003.